

LE-7液体酸素ターボポンプの軸振動に関する研究

著者	吉田 誠
号	2236
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/7509

よしだ まこと

氏 名 吉 田 誠

授 与 学 位 博士 (工学)

学位授与年月日 平成11年3月25日

学位授与の根拠法 学位規則第4条第1項

研究科、専攻の名 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻

学 位 論 文 題 目 LE-7 液体酸素ターボポンプの軸振動に関する研究

指 導 教 官 東北大学教授 上條謙二郎

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 上條 謙二郎 東北大学教授 井小萩 利明

東北大学教授 谷 順二 東北大学助教授 尾池 守

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒論

1994年2月に打ち上げられたH-2ロケットの試験機1号機は、我が国のロケット技術の粋を結集した全段国産の2段式ロケットである。このH-2ロケットの開発において、特に第1段主エンジンであるLE-7エンジンの開発は困難が多く、中でもターボポンプの軸振動問題には解決に多くの時間を費やした。

ロケット用ターボポンプは、高出力でありなおかつ小型・軽量を極限まで追求しているという点において、他の産業用ポンプと一線を画する。ポンプの小型化は一般に高速化によって達成されるが、このような単位重量当たり的高出力化を進めた限界設計により、ポンプ内部、あるいはポンプと配管系などによる構造系の固有振動数を低下させ、特にロケット用ターボポンプに顕著に現れる流体関連振動を引き起こす原因となっている。

有人の場合は言うに及ばず、人工衛星を打ち上げる場合でも、ペイロードは非常に高価であるため、ロケットは高い信頼性を確保する必要がある。その一要素であるターボポンプも高い信頼性を確保するために、軸振動を低減することが極めて重要である。なぜなら、LE-7液酸ターボポンプの場合を例に取れば、油などの潤滑剤を一切使用できない酸素雰囲気中で高速回転する軸受、高圧液体酸素とタービン駆動用高温高圧水素過濃燃焼ガスを完全に分離し、なおかつガスの漏れ量を最小限にするために軸との隙間が微少である軸シールなどの要素が、軸振動により破損すれば致命的な結果を招くことにもなりかねない。

本研究は、こうした背景から、LE-7液酸ターボポンプの開発を通じて得た知見をもとに、軸振動という立場からの設計方針、振動問題とその解決方法、将来に向けた振動計測法の基本を示すことにより、LE-7液酸ターボポンプの振動問題について総合的な解明を行うことを目的とした。

第2章 液酸ターボポンプの機械および流力特性

本研究の対象である液酸ターボポンプを搭載するLE-7エンジンは、液体酸素／液体水素を推進剤とした推力100トン級のエンジンで、スペースシャトル主エンジン(SSME)と同じ2段燃焼サイクルを採用しているため、高性能だが技術的な難易度も高く、開発は困難であった。

図1に液酸ターボポンプの概略を示す。設計回転数は20,000rpm、吐出圧力30MPa以上、流量

約 200 l/s の高圧ターボポンプである。なお、運用に当たってはシステム側の要求から回転数で1割ほど下げて運用されている。吸い込み性能を確保する方法としては、システムの簡素化を重視したためブーストポンプを別に設けずに、インデューサによる方法を採用した。NPSH 30m という要求値に対して、20m 近くまで揚程低下のない良好な性能を示している。また、流量変化に対する揚程曲線は主ポンプ、スプリットポンプとも作動域全体にわたって右下がりとなっており、流力的に安定したポンプである。

軸受はPTFE 保持器による自己潤滑方式で液体酸素により冷却を行うタンデム式玉軸受であり、耐久試験でも摩耗は極めて少なく、十分な性能を示している。軸シールはタービン側の高温燃焼ガスを低温水素ガスで置換することにより、システムの熱負荷を軽減し信頼性向上を図っている。

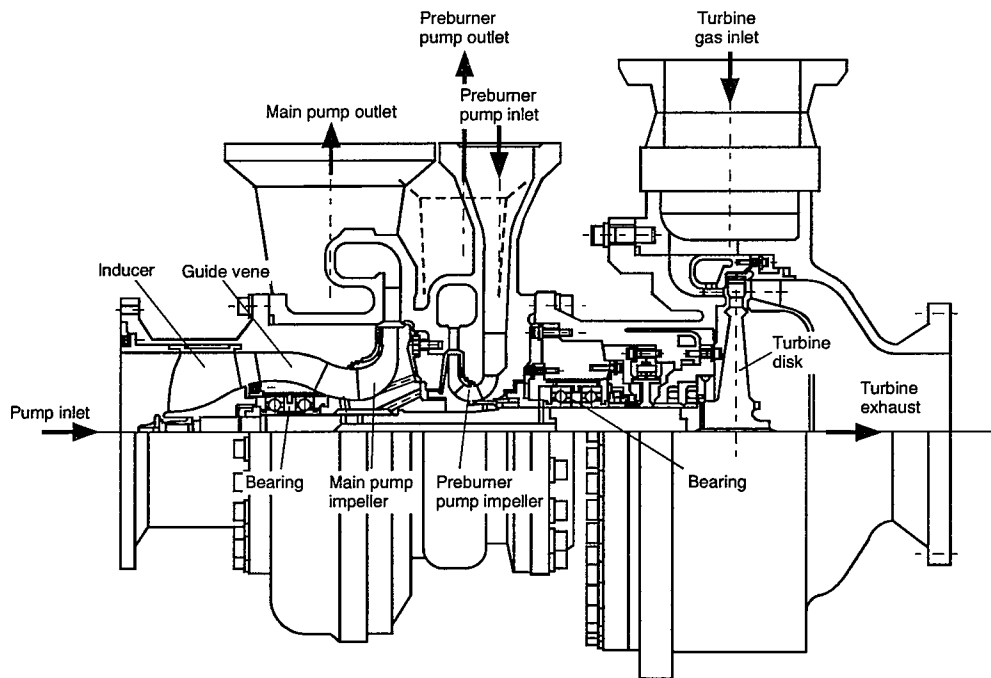


図1 LE-7 液酸ターボポンプ

第3章 危険速度感度マトリクス法を用いた回転系の最適設計

ターボポンプを設計する上で、軸振動の立場からまず考慮すべきことは危険速度である。危険速度を考慮した軸系設計方法として、「ポンプ側危険速度を超えないように設計回転数を設定する」という基本方針を立てた。この方針は、特にインデューサ、主羽根車などの比較的径の大きな部品が高圧酸素中で高速回転する液酸ターボポンプにとっては、事故を防ぐためにも重要である。

危険速度は通常、離散化した数値モデルによる伝達マトリクス法で計算されるが、設計初期の段階で軸系構成をいろいろと検討する必要がある場合には非効率的である。そこで、軸系の構造を変更したときの危険速度位置を簡単に予想する方法として、次の式によって表される感度マトリクス法を導入した。

$$\{\Delta V_{cr}\} = [S] \cdot \{\delta F\}$$

$\{\Delta V_{cr}\}$: 危険速度ベクトル

$[S]$: 感度マトリクス

$\{\delta F\}$: 因子ベクトル

基本設計方針を満足するように液酸ターボポンプの軸系構成を決定するに際して、この感度マトリクス法は有効でありかつ効率的であった。

また、感度マトリクス法の精度および適用範囲を検証するために行った伝達マトリクス法との比較では、因子で最大 40%程度の変更を加えても両計算結果に大きな誤差はなく、実用範囲において十分精度を持つことを示した。また、構造変更に伴って振動モードがまったく異なるものになるような危険速度については大きな誤差を含む可能性もある。

この方針に沿って設計された LE-7 液酸ターボポンプは、定常運転時の振動が $20\mu\text{m p-p}$ 程度の低いレベルに抑えられており、基本設計方針および感度マトリクス法の有効性を実証した。

第4章 回転非同期軸振動の解明と抑制

LE-7 エンジンでは、インデューサにより吸い込み性能を確保する方法を採ったため、インデューサの使用条件は極めて厳しく、その吸い込み性能がターボポンプの回転数を決定することとなった。

回転非同期振動

液体酸素ターボポンプの開発初期の段階で、キャビテーションが原因と考えられる回転同期以上の超同期振動と、亜同期軸振動が発生した。これらの振動は非常に似通った条件の下で発生した。

超同期振動は吸い込み性能試験でポンプ入口圧力を下げるに従って、回転同期に対する周波数比が 1.2 から 1.0 に近づき、回転同期に一致した後は、振幅が増大するという傾向がある。また、インデューサの揚程は超同期振動発生中は不安定であり、特に回転同期振動が増大したときには揚程が大きく低下する。これらの特徴から、超同期振動は旋回キャビテーションによるものであると判断した。

また、非同期振動の特徴を明らかにするためにポンプ入口、主ポンプ出口、スプリットポンプ出口に振動圧センサを取り付けた試験を行ったところ、超同期振動はキャビテーションのセルと 3 枚の羽根との干渉による振動が入口付近の振動圧に大きく現れる旋回キャビテーションの特徴を示していたのに対して、亜同期振動は全ての振動圧にはっきりと現れていた。このことから、亜同期振動はポンプの上・下流の配管系等を含めた全体システムに発生する流れの変動を原因としたシステム振動に類するものであるため、キャビテーションサージであると判断した。

抑制対策

旋回キャビテーションは、チップキャビテーションと深く関わっていることから、チップすき間を変えた試験を試みた。その結果、入口リングの内径をチップすき間 ($0.075\sim 0.08\text{mm}$) と同じ、あるいはそれ以上に拡大したときに、キャビテーションによる軸振動がほぼ消滅した。この対策は旋回キャビテーションに対してとられたものだったが、同時にキャビテーションサージによる亜同期振動も抑制された。

キャビテーションサージの解析

通常、サージングと呼ばれる現象は数ヘルツ程度の比較的ゆっくりした振動であるのに対して、本試験で観察されたキャビテーションサージは非常に高い振動数を有している。この現象を解析するために、簡素化した数学モデルから固有値問題を構成し、流量変動に対するキャビティ体積変化の割合（マスフローゲインファクタ）の位相遅れを考慮することによって、このように高い周波数を説明できることを示した。図 2 にその計算結果を示す。斜線の四角形領域が供試インデューサのパラメータを使って求めた、実験でのキャビテーション数に対応する領域である。

両現象の比較

上記の計算結果と、辻本、上條らによる旋回キャビテーションに対する解析結果は非常に似通っており、また解析による両現象の発生条件も全く同じであることから、インデューサ上流ケーシングの形状を変更したことが両現象を同時に抑制した理由も理解できる。

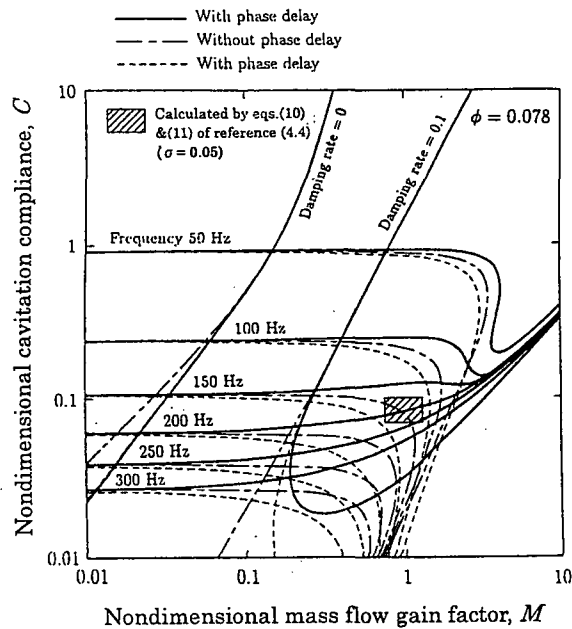


図2 キャビテーションサージに対する計算結果

第5章 軸受荷重測定システムの構築

液酸ターボポンプの開発では、軸変位、加速度、圧力振動等で軸振動を判断していた。しかし、多くの振動問題を経験する中で、振動に伴う荷重を直接計測することが、ターボポンプの寿命を左右する軸受、シール等の信頼性を向上させるために、そして、ロケット用ポンプに顕著に現れる流体関連振動等の振動問題が発生したときにより多くの的確な情報を得るために、極めて重要であることを改めて認識した。

そこで、高速回転する軸受に作用する荷重ベクトルを、重量・スペースを犠牲にすることなく動的に測定し、今後開発されるターボポンプの軸振動に対するヘルスマonitoring技術としても適用可能な、軸受カートリッジによる軸受荷重測定システムの検討を行った。その結果、歪みゲージ出力をフーリエ級数で表現することにより、歪みゲージの出力波形と、必要なゲージ数との関係を明らかにした。LE-7 液酸ターボポンプに適用可能な供試体（軸受カートリッジ）は、歪みゲージ出力に 3θ の高次変形成分が容認できない大きさで含まれていたため、6ゲージ法を新たに考案して、校正方法、データ解析用ソフトウェア等を含めた全体システムを構築し、その有効性を確認した。

第6章 結論

LE-7 液酸ターボポンプの振動問題について、軸振動という立場から総合的な検討を行い、危険速度感度マトリクス法による回転系設計の有効性、旋回キャビテーション、キャビテーションサージによる回転非同期振動の解明と抑制対策、軸受カートリッジによる振動測定システムの基本原理などを示した。

審査結果の要旨

H-II ロケット第一段主エンジン (LE-7) の重要要素であり推進剤を燃焼器に供給する液体酸素ターボポンプは高い信頼性が要求され、これを実現するには高速運転時の軸振動を低減することが極めて重要である。本論文は、同液体酸素ターボポンプの開発を通じて行った軸振動抑制のための設計方法、発生した振動問題とその解決方法を示すとともに新しい振動計測法を提案することにより、同液体酸素ターボポンプの軸振動問題について総合的な解明を行うことを試みたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は緒論である。

第 2 章は、LE-7 エンジンおよび本研究の対象である液体酸素ターボポンプの機械的および流体力学的特性を概説した。

第 3 章は、液体酸素ターボポンプの設計において、軸振動抑制の観点から回転軸の危険速度と振動特性を主眼とした設計方法を示した。すなわち軸系の設計変更に伴う危険速度位置の移動量を予想する手段として危険速度感度マトリクス法を提案し、LE-7 液体酸素ターボポンプの設計を通してその有効性を示した。これは工学的に有用な成果である。

第 4 章は、開発過程で経験した超同期ならびに亜同期の軸振動の原因はそれぞれインデューサーに発生した旋回キャビテーションとキャビテーションサージであることを明らかにした。また同一方法により両軸振動が抑制できること、ならびに旋回キャビテーションとキャビテーションサージが極めて類似した現象であることを明らかにした。これは工学的に有用な知見である。

第 5 章は、ロケットターボポンプにおける軸振動測定法として、軸受カートリッジをそのままロードセルとして使用する軸受荷重測定法について示した。この方法を用いれば、LE-7 液体酸素ターボポンプの大幅な設計変更や重量増加なしで、軸受にかかる荷重ベクトルの測定が可能であることを示した。

第 6 章は結論である。

以上要するに、本論文は LE-7 液体酸素ターボポンプの回転系設計における危険速度感度マトリクス法の有効性ならびにキャビテーションにより発生した回転非同期軸振動の原因と抑制法を明らかにし、さらに新たな軸振動測定システムの提案を行ったものであり、LE-7 液体酸素ターボポンプの開発に貢献したのみではなく、今後のロケット用ターボポンプの開発ならびに振動工学および機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。